PROGRAMA PSIQUIS – Proyecto II: Neurona (Primera parte)

Dante Roberto Salatino[1]

Resumen: El propósito de este trabajo fue desarrollar la primera parte del segundo proyecto del Programa Psiquis. En esta oportunidad, lo que se pretendió fue sentar las bases teóricas del funcionamiento de una neurona artificial única, para luego, en una segunda parte, proceder a su ensamble práctico, con otras con las mismas características para generar un Psicocito (o célula psíquica) que es la unidad funcional y operativa del aparato psíquico propuesta por la Lógica Transcursiva. Siguiendo sus lineamientos, se pudo emular el funcionamiento de una neurona natural desde el punto de vista eléctrico, mediante el uso de un software profesional (Electron®), para generar los circuitos respectivos que luego, en una segunda etapa, serán probados en una plataforma Arduino®. En esta oportunidad, luego de mostrar la existencia de sistemas naturales (amebas, hongos) que evidencian un comportamiento similar, se demuestra que cualquier neurona es a la vez, un resonador (porque puede generar ondas de una frecuencia determinada como también, seleccionar frecuencias específicas de una señal); es una unidad de aprendizaje (ya que la frecuencia es memorizada para servir a dos propósitos. Por un lado, para identificar el sistema real (biológico, psíquico o sociocultural) desde dónde viene el estímulo, y por otro, para saber en qué sistema se debe proyectar la respuesta, que obviamente es el mismo; y por último, es un sistema memristivo, es decir, con memoria, y que esta facultad de poder “retener” una historia, la ejerce sin consumir energía, lo cual aproxima aún más este desarrollo a la eficiencia que muestra nuestro cerebro, encaminando esta investigación hacia un posible cambio del paradigma actual de las neurociencias.

---

[1] UNCuyo. DOI: 10.5281/zenodo.4732255

Palabras claves: Inteligencia Artificial, Estructura y función psíquicas, Neurobiología, Neurociencia, Lógica Transcursiva.

1.0. INTRODUCCIÓN

El aparato psíquico que estamos planteando, y que justificamos en los aspectos neuro-electrofisiológicos del cerebro, tiene como principal fundamento la posibilidad de reconocer "patrones periódicos de cambio", que se dan en el entorno en donde se desenvuelve. Esto es posible, según la teoría defendida en este trabajo (Salatino, 2013), debido a la presencia de ubicuos osciladores biológicos, que, mediante una determinada frecuencia natural de oscilación pueden entrar en resonancia con los patrones que se dan en el exterior.

Lo anterior, permite que su poseedor pueda aprender, conocer y comprender, para crecer, desarrollarse y evolucionar adaptándose a un medio cambiante.

Los estímulos externos ponen en funcionamiento uno o más de los osciladores naturales que poseemos, lo que nos permiten reconocer los patrones y predecir eventos.

Es importante destacar que no solo las oscilaciones son determinantes a la hora de conseguir un adecuado funcionamiento de la psiquis, sino también, los cambios que ocurren durante un periodo finito de tiempo, y que dependen del estado previo del sistema. La importancia de esto radica en que, más que una activación de los osciladores biológicos, produce un "efecto memoria" que nos posibilita evolucionar y no solo sobrevivir.

Estos sofisticados mecanismos que dan sustento al funcionamiento de nuestro aparato psíquico, pueden comprobarse en una simple neurona, y es sobre lo que vamos a tratar en este artículo.

2.0. ANTECEDENTES BIOLÓGICOS

Un comportamiento como el que hemos esbozado no es patrimonio exclusivo del hombre, sino que se puede observar en otros seres vivos. Solo a modo de ejemplo, analizaremos el caso de la ameba *Physarum polycephalum* (Figura 1).

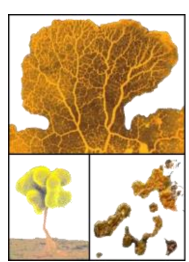


Figura 1 *Physarum polycephalum* (distintos estadios)

Este organismo microscópico, unicelular, que tiene una apariencia cambiante entre moho y ameba, se caracteriza por huir de la luz y por engullir todo lo que encuentra a su paso, cuando está en su fase de alimentación. Inclusive, si detecta fuentes de alimentación dispersas, tiene la curiosa habilidad de producir microtúbulos que las conectan, resolviendo así de modo natural, el problema de encontrar el camino más corto entre dos puntos.

Además, posee mecanismos que dependen del estado del sistema y de su historia dinámica, dando lugar a una respuesta de "memoria" (Pershin et al., 2009). Esta ameba contiene en su interior una solución *sol-gel*. El *gel*, presente en el *ectoplasma*[2] es más denso, mientras que el *sol*, más líquido, se encuentra en el *endoplasma*[3].

[2] Región periférica de una célula, que se encuentra debajo de la membrana plasmática.

[3] Parte del citoplasma celular que se encuentra próxima al núcleo.

Este *sol-gel* es un líquido *tixotrópico*[4], es decir, puede cambiar su viscosidad en función de la presión, lo cual le permite emitir *seudópodos*[5] para desplazarse y capturar su alimento, cuando comprime su citoplasma mediante las pequeñas fibras musculares que lo rodean.

El mecanismo anterior, esto es, el generar canales de menor resistencia para desplazarse, se dispara cuando la temperatura y la humedad externa al organismo cambian, transformando el flujo del *sol* de una manera no lineal. La restauración del estado inicial, cuando las condiciones ambientales se restablecen, tarda un tiempo que depende del número y forma de los canales de baja viscosidad formados. Esto representa, sin más, un "mecanismo de memoria", en donde, la variación de un parámetro externo, o bien crea un canal nuevo o modifica alguno existente, alterando su "resistencia" de manera no lineal.

Cuando la *Physarum* fue expuesta a condiciones desfavorables, representadas por tres choques térmicos consecutivos a intervalos regulares (Saigusa, 2008), redujo su velocidad de locomoción en respuesta a cada episodio. Cuando fue puesta, posteriormente, en condiciones favorables, redujo en forma espontánea su velocidad de desplazamiento ante la presencia de un solo episodio desfavorable, lo cual implica la anticipación de un cambio ambiental inminente, mediante un "mecanismo de memoria".

3.0. LA NEURONA COMO RESONADOR

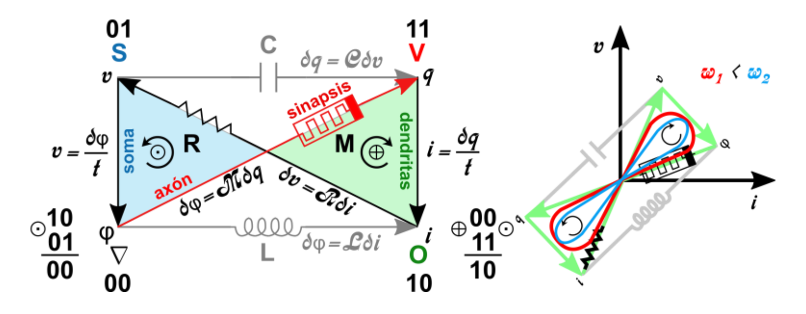
---

[4] La *tixotropía* es propia de los líquidos no newtonianos, o sea, aquellos que cambian su viscosidad con el tiempo. Por ejemplo, cuanto más se los somete a una presión, más disminuye su viscosidad.

[5] (Falso pie): Prolongación del citoplasma de algunos organismos unicelulares.

Un resonador se utiliza tanto para generar ondas de una frecuencia determinada como para seleccionar frecuencias específicas de una señal. En un trabajo anterior (Salatino y Puglesi, 2018a) definimos la neurona, desde el punto de vista eléctrico, como un resonador que captura ciertas frecuencias del ambiente, pero que a la vez, sincroniza el disparo de su respuesta, con la frecuencia natural del sistema real[6] percibido.

Las tareas detalladas se llevarían a cabo mediante la combinación de tres supuestos elementos eléctricos pasivos (que disipan o almacenan energía) como son: el *resistor*, el *capacitor* y el *inductor*. Pero, si agregamos un supuesto cuarto elemento eléctrico fundamental, como lo es el *memristor*, entonces, la neurona adquiere una capacidad de memoria, que le permite almacenar en su sinapsis, para recordarla luego, la frecuencia, o lo que es lo mismo, el sistema real percibido que generó el aprendizaje, como también, "saber" en qué sistema real debe ser proyectada la respuesta; todo esto expresado en un valor específico de resistencia (Figura 2).



[6] Sistemas reales: *Sistema bio-externo(80Hz)* (lo que tiene que ver con la vida y nuestro cuerpo). *Sistema psico-interno(40Hz)* (lo que tiene que ver con nuestra relación con el entorno inmediato). *Sistema sociocultural(20Hz)* (lo que tiene que ver con nuestra vida de relación con los demás).

Figura 2 PAU RESONADOR

Referencias: C: capacitor – L: inductor – R: resistor
M: memristor – *v*: voltaje – *i*: corriente – *q*: carga - φ: flujo
S: sujeto – O: sistema bio-externo – V: sistema sociocultural
∇: sistema psico-interno - ω: frecuencia - ⊕: XOR - ⊙: XNOR

De acuerdo con la propuesta anterior, podríamos decir que una neurona estaría compuesta desde el punto de vista eléctrico, por un oscilador acoplado a una resistencia con memoria. Veremos a continuación las potencialidades que posee esta configuración con sus posibles variantes, y cómo es posible que una neurona se convierta en la unidad de aprendizaje del aparato psíquico.

4.0. LA NEURONA COMO UNIDAD DE APRENDIZAJE

Hay una equivalencia directa entre el proceso biológico de aprendizaje registrado en una célula, como ya vimos, y el circuito eléctrico propuesto. Las oscilaciones naturales están representadas por la parte del circuito formada por L (inductor) y C (capacitor), que constituye, *per se*, un oscilador. La resistencia común (R) indica que hay dentro de la célula cierta disipación de energía, y además, que la señal no puede viajar en forma instantánea ni en forma indefinida. Finalmente, la resistencia con memoria (M) o memristor, retiene la frecuencia por la que fue alcanzada la célula, y lo hace a través de un valor de resistencia. Esa frecuencia memorizada sirve a dos propósitos. Por un lado, para identificar el sistema real desde dónde viene el estímulo, y por otro, para saber en qué sistema se debe proyectar la respuesta, que obviamente, es el mismo. Las condiciones ambientales en las que se desenvuelve la neurona son emuladas mediante el voltaje aplicado desde afuera, mientras que, la capacidad de respuesta,

es decir, tanto la velocidad con que responde como la especificidad con que lo hace, está emulada por el voltaje que maneja el memristor, esto es, la sinapsis o conexión con otra neurona (Figura 3).

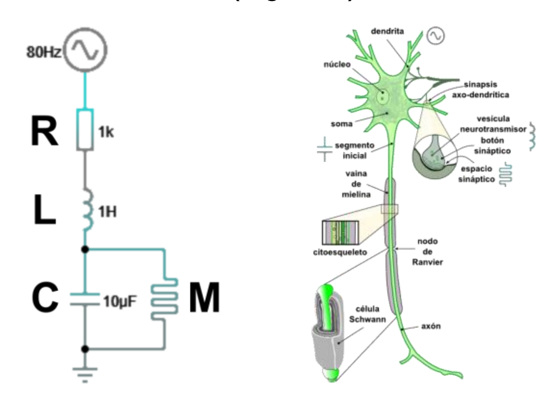


Figura 3 NEURONA
Referencias: 80Hz: frecuencia estimulación – R: resistor
L: inductor – C: capacitor – M: memristor

En el circuito anterior están representados los elementos constitutivos de una célula neuronal. El generador de ondas representa las dendritas, es decir, los estímulos entrantes. El capacitor (C), el soma, específicamente, el segmento inicial donde se produce el disparo del potencial de acción. El inductor (L), el botón sináptico, donde se libera el neurotransmisor, y, el memristor (M), la sinapsis propiamente dicha, en donde se “almacena” la frecuencia (mediante un valor de resistencia) con que la neurona está siendo estimulada, información que le dice de qué sistema real le está llegando el estímulo, y a qué sistema real tiene que enviar la respuesta, una vez que sea elaborada.

5.0. LA NEURONA COMO SISTEMA MEMRISTIVO

La sugerencia de que en la neurona existen elementos que son capaces de almacenar información sin la necesidad de consumir energía, representa un verdadero cambio de paradigma en la neurociencia. Además, como la información que maneja abarca un rango variable y continuo, desestimaría que el funcionamiento neurológico, y principalmente del cerebro, fuera digital como lo sugieren las neurociencias actuales. Un mecanismo tal, justifica tanto el comportamiento adaptativo y espontáneo del aparato psíquico que venimos promoviendo desde la LT, como así también, cómo es que se lleva adelante el aprendizaje, o cómo se opera la puerta de entrada al conocimiento.

Un sistema memristivo es aquel elemento eléctrico de naturaleza pasiva que tiene la posibilidad de establecer una interrelación entre la carga y el flujo, que no necesariamente debe ser interpretado como magnético, y en donde, la resistencia depende del estado interno del sistema, es decir, de su historia. Hay varios sistemas como éste. Solo a modo de ejemplo, podemos mencionar aquellos en los que su resistencia eléctrica depende de la temperatura; otros, en donde la resistencia varía de acuerdo con los cambios de su estructura atómica; o, donde el movimiento iónico determina la resistencia cuando el sistema es atravesado por una carga. Hay autores que sugieren (Di Ventra et al., 2009) este tipo de “memoria”, no solo se limita a las resistencias, sino que pueden generalizarse a otros elementos pasivos, como los capacitores y los inductores.

Podríamos decir, en forma muy general que, si *x* denota un conjunto de *n* estados variables que describen el

estado interno del sistema analizado, y que *u(t)* e *y(t)* son un par cualesquiera de variables complementarias (tensión-corriente, carga-flujo), que denotan la entrada y la salida del sistema, mientras que *g* es una respuesta general, un sistema memristivo respondería a la expresión 1, siendo 2 una posible solución que nos hablará de su historia o devenir (Figura 4).

$$y(t) = g(x, u, t)u(t) \qquad (1)$$

$$\dot{x} = f(x, u, t) \qquad (2)$$

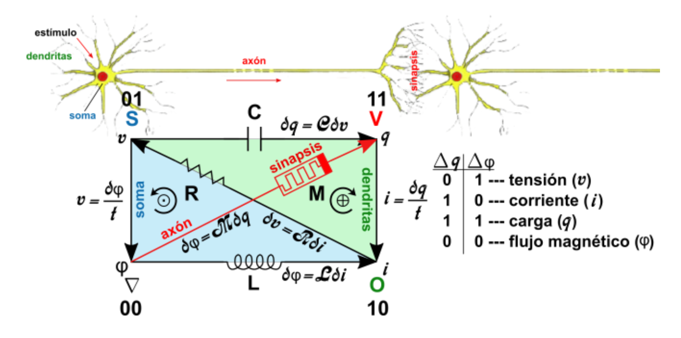


Figura 4 PAU NEURONAL
Referencias: C: capacitor – R: resistor – L: inductor - M: memristor
Δ: variación – S: sujeto – O: sistema bio-externo (80Hz)
V: sistema sociocultural (20Hz) - ∇: sistema psico-interno (40 Hz)
⊕: XOR - ⊙: XNOR

La Figura 4 plantea la emulación del funcionamiento eléctrico de una neurona tipo, desde el punto de vista conceptual. Distinto es el caso, cuando se intenta llevar este funcionamiento a la práctica. El circuito de la Figura 5 emula muy aproximadamente el funcionamiento neuronal normal.

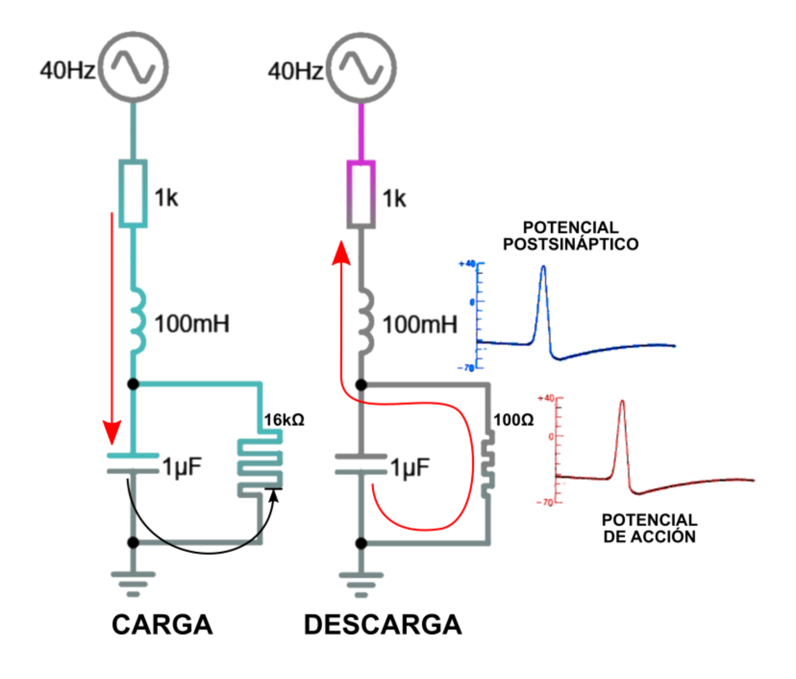


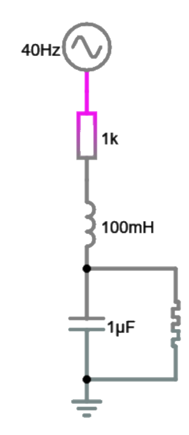
Figura 5 EMULACIÓN DE LOS PROCESOS ELÉCTRICO Y QUÍMICO DE UNA NEURONA

En la Figura 5 vemos dos estados internos distintos de la misma neurona. Por un lado, los estímulos entrantes van cargando el soma (representado en CARGA, por el condensador), positiva o negativamente, dependiendo si es una neurona excitatoria o inhibitoria. Durante este proceso, el memristor muestra un valor de resistencia máximo (16kΩ), impidiendo así, que la corriente se derive por el circuito paralelo.

Alcanzado cierto umbral (carga máxima del capacitor – segmento inicial en Figura 3), el memristor pasa a su nivel de resistencia mínimo (100Ω), permitiendo que el capacitor se descargue bruscamente, produciendo el *potencial de acción*, que viajará por el axón, rumbo al

botón sináptico. Cuando llega allí, abre los canales de Ca^{++} operados por voltaje. El ingreso de Ca^{++}, a su vez, abre las vesículas que contienen el neurotransmisor específico, y lo vuelca al espacio sináptico (aspecto representado por el inductor). Cuando el neurotransmisor alcanza la neurona postsináptica, genera un potencial idéntico (sin pérdidas) al recibido. De esta forma, un proceso eléctrico se transforma en un proceso químico, para luego regenerar el mismo proceso eléctrico en otra neurona, secuencia que es perfectamente emulada por el circuito presentado (Figura 6).

En la figura que sigue se observan los registros del oscilador (estímulos que ingresan por las dendritas), la descarga del potencial de acción (segmento inicial – condensador), la descarga del neurotransmisor (botón sináptico – inductor), y las variaciones de la resistencia que se producen en el memristor, emulando la sinapsis, en donde se “memoriza” la frecuencia con que fue “impactada” la neurona, que no es otra cosa que un indicador de cuál es el sistema real involucrado, y en dónde se debe proyectar la respuesta.



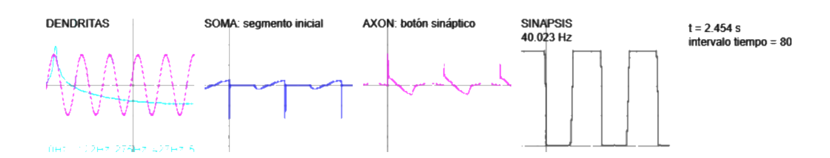


Figura 6 REGISTROS

6.0. ALGUNAS CONSIDERACIONES TEÓRICAS

En la Figura 7 se proyectan las variaciones de tensión y de corriente, como así también, de la resistencia, mientras un memristor está siendo estimulado. Se puede ver, además, el ciclo de histéresis típico cuando se considera las variaciones de tensión contra las de la corriente.

Una de las características más notables de un memristor es que se comporta como una resistencia lineal cerca de una frecuencia de estimulación infinita, y como una resistencia no lineal, cerca de una frecuencia cero.

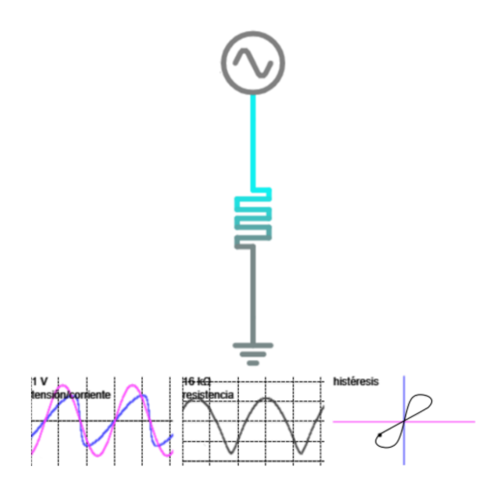


Figura 7 EMULACIÓN MEMRISTIVA

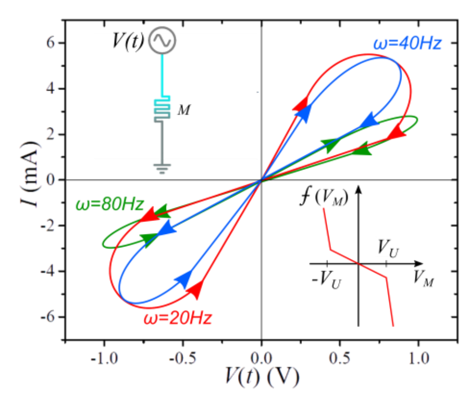


Figura 8 MEMRISTOR CONTROLADO POR VOLTAJE
Referencias: *V(t)*: voltaje aplicado – *M*: memristor - ω: frecuencia
f(V_M): función – V_U: umbral

En la Figura 8 se aprecia cómo el *loop* de histéresis se "aplana" (tiende a convertirse en una recta) a medida que aumentamos la frecuencia. Es así, cómo "recuerda"

la frecuencia que lo estimuló, o lo que es equivalente, el grado de resistencia que ofreció al paso de la corriente, en el momento en que se le deja de proveer tensión.

Por otro lado, en el esquema inferior derecho, se puede ver cómo la resistencia del memristor cambia entre dos valores límites M_1 (100Ω) < M_2 (16kΩ). *M* aumenta como consecuencia de la variación en los estímulos periódicos, y por lo tanto, resulta en un "aprendizaje" del hecho percibido y en relación con qué sistema se lo percibió. Esto constituye una función $f(V_M)$, que describe cómo cambia el estado interno del memristor, cuando alcanza un determinado umbral (V_U), por un fenómeno acumulativo de un cambio externo (estímulo).

Si tenemos en cuenta que adoptamos en este trabajo, la modalidad de la "dinámica acoplada electrón-ion" como el determinante de la resistencia que ofrece un memristor cuando es atravesado por una carga, bien podemos emular el proceso de liberación del neurotransmisor en el espacio sináptico, mediante este mecanismo (Figura 9).

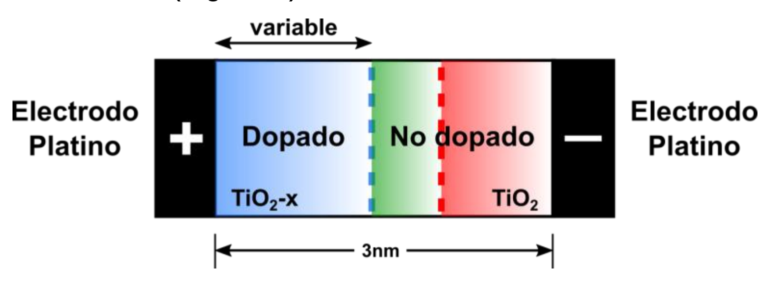


Figura 9 COMPOSICIÓN DE UN MEMRISTOR

La evidencia experimental sobre la posibilidad de una rápida conmutación eléctrica bipolar no volátil, en los nanosistemas fabricados mediante la unión de TiO_2 (dióxido de titanio) y electrodos de platino (Yang et al.,

2008), permite utilizar este mecanismo como un emulador de la carga y descarga de un neurotransmisor en el botón sináptico neuronal. La conmutación se basa en la derivación y recuperación de la barrera electrónica en la interface metal/óxido (botón sináptico/espacio sináptico) causada por la deriva localizada de vacantes de oxígeno (ingreso de iones Ca^{++} que abren las vesículas que contienen el neurotransmisor).

Al removerse los átomos de oxígeno del dióxido de titanio, los “agujeros” que dejan (ausencia de cargas negativas) se comportan como cargas positivas. Una tensión positiva “empuja” las cargas positivas hacia la derecha (en la Figura 9) dentro del otro TiO_2. De esta forma, el espesor del TiO_2-x (dopado) se incrementa (disminuyendo la resistencia y conduciendo), al tiempo que el espesor del TiO_2 se reduce. Si se invierte la tensión, se produce el fenómeno inverso, aumenta tanto la resistencia que prácticamente no hay conducción. La frecuencia que lo hace conducir al memristor, si se interrumpiera la tensión en ese momento es “recordada”, como un valor dado de resistencia. Esto último, además de emular el mecanismo de memoria de una neurona, que recuerda que ha sido utilizada para registrar algún hecho percibido que procede de un sistema real determinado, le dice a la célula cuál es el neurotransmisor que debe liberar, que también depende de qué sistema real sea el que requiere su atención.

6.1. NEUROTRANSMISORES Y SISTEMAS REALES

Los neurotransmisores son sustancias producidas en las neuronas, y que ejercen efectos neurales transitorios (de transmisión y modulación) a través de receptores confinados, en su mayoría, a las uniones sinápticas (Vizi, 2008). Consideraremos aquí, solo el sistema de las monoaminas: Dopamina, Norepinefrina (Noradrenalina)

y Serotonina, en su relación con la hormona Melatonina, que, producida por la glándula pineal, influye en una gran variedad de procesos celulares, neuroendocrinos y neurofisiológicos, como por ejemplo, controlar el ciclo diario del sueño (Pandi-Perumal y Cardinali, 2006).

En este trabajo postulamos una relación directa entre las sustancias mencionadas y los sistemas reales[7].

- *Dopamina*: deriva del aminoácido tirosina. En niveles normales o altos, propicia la concentración, el trabajo intenso, y el estado de alerta. Cuando sus niveles bajan, aparece distracción, no se terminan las tareas a tiempo, hay una tormenta de ideas pero ninguna se lleva a cabo.

- *Serotonina*: deriva del aminoácido triptófano. Con niveles normales o elevados, se logra satisfacción en los emprendimientos, se está de buen ánimo, es posible focalizarse en un solo problema, y es fácil conciliar el sueño. Con niveles bajos pueden generar sentimientos negativos, e inclusive, depresión.

- *Norepinefrina o Noradrenalina*: deriva de la Dopamina. Con niveles óptimos o superiores, estamos propensos a buscar emociones fuertes, a veces extremas, buscar nuevas actividades, mantener un estado de ánimo exaltado, así como también, un estado de alerta máximo. Si sus niveles caen, aparece una especie de anestesia emocional, marcado desgano, y el carácter puede presentar rasgos alternantes de depresión y agresión.

En resumen, la Dopamina tiene que ver con el placer, la motivación, la recompensa por nuestras acciones, y las tareas cognitivas, por lo que está relacionada con el sistema psico-interno de un sujeto. La Serotonina, con el

---

[7] Cf.: 3.0. LA NEURONA COMO RESONADOR.

control del estado de ánimo y las emociones, relacionándose así, con el sistema sociocultural; mientras que, la Norepinefrina se relaciona con el prestar atención a algo, y por lo tanto, con el sistema bio-externo (Figura 10).

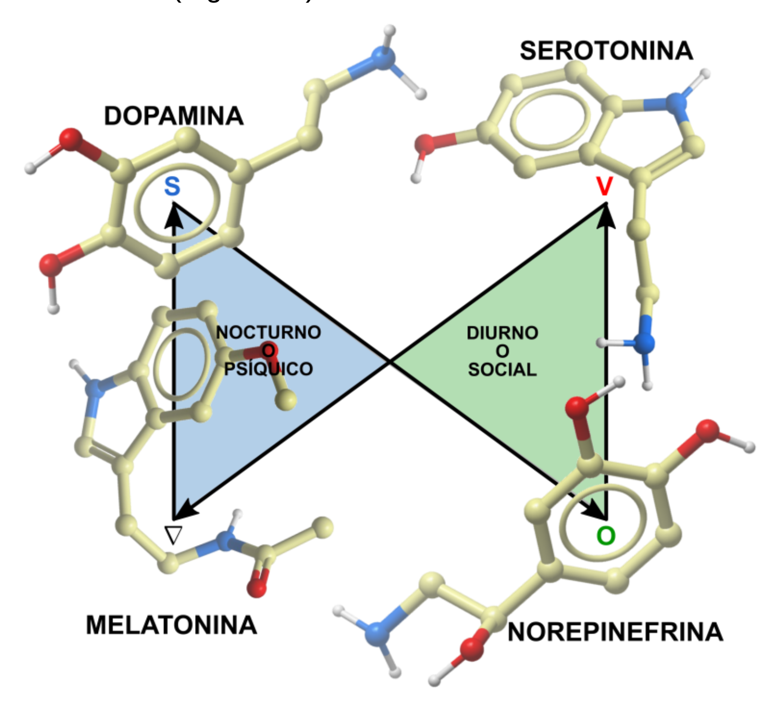


Figura 10 PAU DE LOS NEUROTRANSMISORES
Referencias: S: sujeto – V: sistema sociocultural – O: sistema bio-externo - ∇: sistema psico-interno

De una manera muy simplificada, podemos decir que, ni bien despertamos el sistema dopaminérgico correlaciona los tres osciladores que controlan y regulan los “tres cerebros” (neuronal, visceral, y cortical), y ponen en funcionamiento el marcapasos psíquico (Salatino,

2018b, p. 71), que determina el desempeño de un sujeto frente a los tres sistemas reales. Luego, partiendo de la Dopamina se biosintetiza la Norepinefrina, que permite comenzar a "prestar atención", y percibir el mundo circundante, preparando todo el sistema para la acción.

Si lo percibido tiene que ver con el sistema bio-externo, se debe actuar de inmediato. Los 80Hz a que oscila la neurona indica que libere más Norepinefrina y Dopamina para atender a la coordinación motora necesaria para responder, sin la necesidad de motivación alguna.

Si la neurona oscila a 20Hz, indica que el sistema involucrado es el sociocultural, entonces, se libera Serotonina que como hemos visto, predispone el estado de ánimo para hacer frente al desafío externo, dotándonos del tenor emotivo adecuado (motivación), y así poder actuar en consecuencia.

Si la neurona oscila a 40Hz, significa dos cosas: o bien se está elaborando alguna respuesta demandada en la situación anterior, ya sea concentrándose en experiencias anteriores o elaborándola *de novo*; o bien, estamos manteniendo una actividad vigil (de consciencia) o pensante, o ambas. En los dos casos está involucrado el sistema psico-interno, por lo que se libera más Dopamina.

Dado que somos "animales diurnos", cuando el nivel de luz natural decae, o el sistema en su conjunto, da señales de que ha llegado el momento de descansar y reponer todo el desgaste ocasionado por la actividad desarrollada en vigilia, una parte importante de la Serotonina producida se convierte en Melatonina, que induce el sueño, un fenómeno que no es ni consciente ni inconsciente, sino biológico.

Una vez dormidos, y habiendo superado la fase 4 de este estado fisiológico, en donde se entra en un sueño profundo y verdaderamente reparador, la corteza en su conjunto comienza a oscilar a 40Hz, lo que indica que ha llegado el momento de soñar, algo que se corrobora por la aparición de los “movimientos oculares rápidos” (MOR), algo que promueve la Dopamina. Esta fase ocupa el 25% del ciclo total del sueño. El régimen oscilatorio de 40Hz, que en vigilia nos predispone para enfrentar lo que ocurre en la realidad externa a nuestra psiquis, en estas circunstancias, y dado que todo el sistema motor voluntario está bloqueado, hace que se libere Dopamina que estimulan los Ganglios Basales, pero en sentido inverso, es decir, no nos prepara para percibir lo exterior y buscar una respuesta acorde a la demanda, sino que, escudriñando en la “realidad interna” de nuestra experiencia o historia de vida, hace una proyección sobre la corteza cerebral produciendo una vívida ensoñación, cuya única diferencia con los hechos reales que hemos vivido, está en que, mientras soñamos el pasado, el presente y el futuro se unifican. Esto es, su devenir es “atemporal”, por colapso del psicocito o célula psíquica, que es donde se registra la temporalidad de los hechos almacenados.

Cuando se ha alcanzado un nivel adecuado de reposición, salvo que medie algo que lo interrumpa, volvemos a despertar y el ciclo comienza de nuevo.

Lo que acabamos de describir para el “ciclo circadiano”, se repite en otros ciclos de más largo alcance, como por ejemplo, el cambio de estación, en donde también interviene la Melatonina.

En pocas palabras, en nuestra psiquis, lo que la Serotonina hace con la conducta (lo social) durante el día, la Melatonina, que deriva de la Serotonina, lo hace

con el comportamiento (lo psíquico) durante la noche, transformándose así, en un reloj, un calendario y un faro para los animales migrantes, ya que sus niveles de producción, en estos seres vivos, varía según la frecuencia de las radiaciones electromagnéticas de la tierra que recibe la glándula pineal, y así los guía hacia su destino de migración.

7.0. CONCLUSIONES

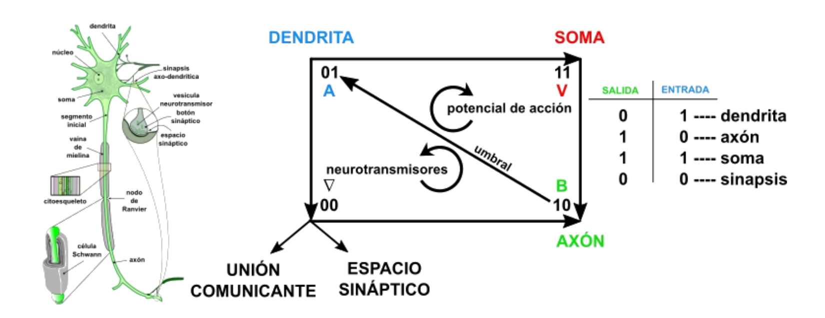


Figura 11 PAU DE LAS INTERACCIONES NEURONALES

La Figura 11 trata de representar las dos conexiones interneuronales más comunes: el llamado *acoplamiento electrónico* (unión comunicante), y la sinapsis química (espacio sináptico). Aunque existen sinapsis mixtas, es decir, la presencia simultánea de una sinapsis química y una eléctrica, en el esquema se han imbricado ambas solo con un fin didáctico.

El esquema interrelaciona los componentes fundamentales de cualquier neurona, y los identifica mediante la entrada y salida de estímulos. El ciclo hacia la derecha que podríamos catalogar de superficial, pues depende de un fenómeno de membrana, identifica de alguna manera lo que tienen en común ambos tipos de

conexiones neuronales. Esto es, la llegada de un estímulo a una dendrita produce un *potencial sináptico* que pasa por el soma (cuerpo) celular en donde es acumulado, llegando al *segmento inicial*, donde comienza el axón, que tiene un sensor de umbral.

Si el umbral no ha sido alcanzado, cicla de la misma forma hasta lograrlo, consiguiendo así disparar un *potencial de acción* que genera una onda de despolarización, que en el caso de la sinapsis eléctrica alcanza la *unión comunicante*, en donde a través del *conexón* (Salatino, 2013, p. 45) se produce un acoplamiento iónico entre las dos neuronas (pre y postsináptica).

En el caso de la sinapsis química, cuando el potencial de acción generado alcanza el botón sináptico se produce una entrada de Ca^{++} a la célula que abre las vesículas del neurotransmisor involucrado, que es volcado en el espacio sináptico en busca de sus receptores específicos en la neurona postsináptica. Cuando, neurotransmisor y neuroreceptor se ponen en contacto, surge en la neurona postsináptica, o bien un *potencial excitatorio postsináptico*, o bien una *hiperpolarización* (lo electrónicamente opuesto a una *despolarización*), llamada *potencial inhibitorio postsináptico* (Figura 12).

Con el circuito eléctrico que hemos planteado, pudimos emular el proceso anterior, por lo menos, en sus aspectos fundamentales.

Hemos demostrado que mediante la conjunción de los elementos eléctricos pasivos, cuyos equivalentes se encuentran en cualquier neurona, se puede construir una célula neuronal artificial que remede en forma muy ajustada, los procesos neurobiológicos básicos, alejándose de esta manera, del planteo de una neurona

artificial que se sustenta en unas pocas operaciones matemáticas, que nada tienen que ver con lo que sucede biológicamente (Figura 13).

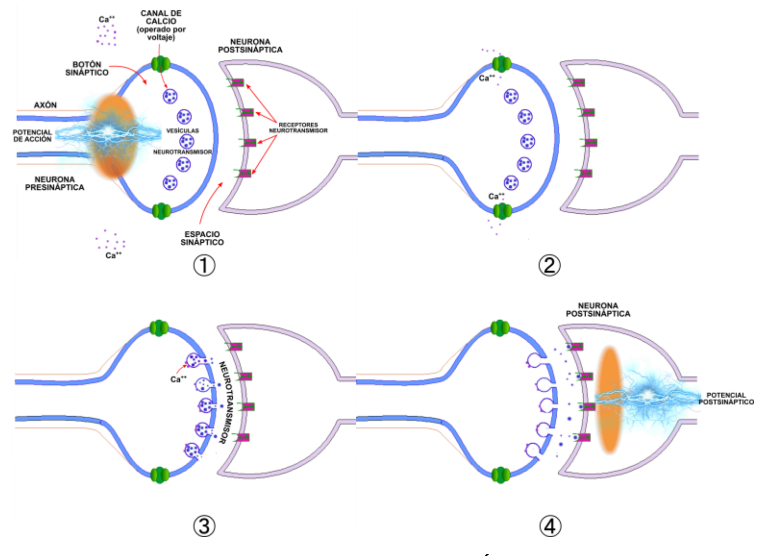


Figura 12 SINAPSIS QUÍMICA

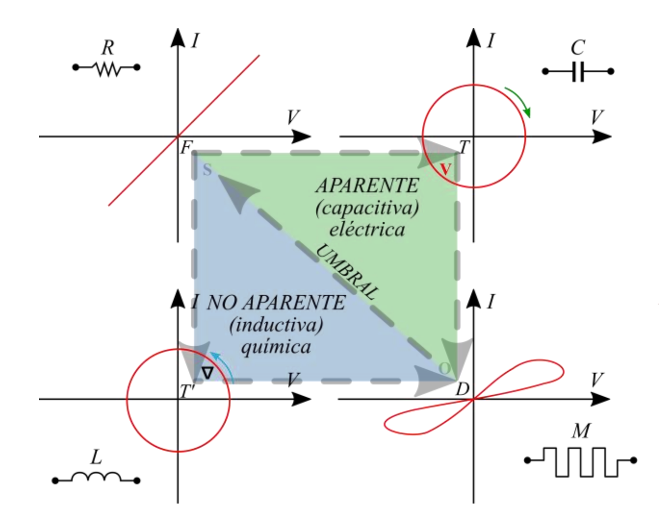


Figura 13 PAU DE LOS ELEMENTOS PASIVOS NEURONALES

Referencias: *R*: resistor – *C*: condensador – *L*: inductor – *M*: memristor – *V*: tensión – *I*: corriente – *F*: fuente – *D*: destino – *T*: transformación aparente – *T'*: transformación no aparente – S: sujeto O: sistema bio-externo – V: sistema sociocultural - ∇: sistema psico-interno

En la Figura 13, en un PAU se han interrelacionado los aspectos eléctricos que se ponen en juego en la neurona emuladora que hemos presentado. Vemos allí que teniendo en cuenta la respuesta natural de cada elemento pasivo utilizado, podemos ajustarnos a los principios de la Lógica Transcursiva. Esto es, establecer una unidad estructural y funcional (PAU) en donde se constituye una conexión de Galois, o sea, una oposición mediada por otra oposición. La primera oposición planteada está representada por el resistor lineal[8] (R), disipador de energía, que representa a las dendritas de una neurona, y el memristor (M) o una resistencia con memoria, no lineal[9], cuyo almacenamiento de información no consume energía, que representa la sinapsis; los dos polos operativos de una neurona (entrada y salida de información). Ambos están ligados por un umbral que, una vez alcanzado, pone en funciones la otra oposición.

La otra oposición la componen los elementos que, si bien almacenan energía, necesitan de ella para lograr dicho almacenamiento. Así, por un lado, tenemos el capacitor (C) que almacena energía en forma de un campo eléctrico, por eso representa el segmento inicial de la neurona, que es donde se genera el potencial de acción. Por el otro lado, está el inductor (L) que almacena energía en forma de campo magnético, por

[8] Es decir, donde la relación entre tensión y corriente es proporcional.
[9] En donde, la relación entre tensión y corriente no es proporcional.

eso representa dos cosas: la liberación del neurotransmisor, y la generación de un disparo eléctrico como consecuencia de una corriente inducida (potencial postsináptico). En ambos elementos pasivos, la respuesta natural es exponencial, o sea, en donde la tasa de cambio es proporcional a las magnitudes que se manejan. Además, tienen un sentido evolutivo contrapuesto (representado por el sentido de giro en el gráfico anterior), lo cual emula absolutamente el comportamiento de los niveles superficial y profundo del PAU. Para completar la similitud de la respuesta natural de este circuito con la de la neurona natural, podemos decir que la respuesta exponencial es representativa de varios fenómenos que ocurren en la naturaleza, y que muestran un comportamiento creciente/decreciente. Por ejemplo, el decaimiento del uranio, el crecimiento poblacional, el calentamiento, el enfriamiento, entre muchos otros.

Por último, podemos decir que la propuesta que acabamos de hacer es superadora, aún de las más recientes hechas en el campo de la "Ingeniería Neuromórfica" (Zyarah, 2020). Esta afirmación se sustenta en que, la pretensión de comprender cómo funciona nuestro cerebro, con solo invocar una supuesta "identidad morfológica" con las neuronas individuales, no se basa en ninguna teoría neurobiológica consistente. Decir que el haber diseñado rutinas computacionales que generan operaciones de cómputos que afectan a cómo se representa la información, presentan una notable robustez al daño, incorporan aprendizaje (basado en redes neuronales artificiales tradicionales), y se adaptan a cambios locales (generados exprofeso), no es lo mismo que emular el funcionamiento neuronal natural, ni mucho menos, la inteligencia natural que supuestamente deriva de él.

REFERENCIAS

Di Ventra, M.; Pershin, Y.V.; Chua, L.O. (2009). *Circuit Elements with Memory: Memristors, Memcapacitors and meminductors*. arXiv:0901.3682v1 [cond-mat.mes-hall].

Pandi-Perumal, S. R.; Cardinali, D. P. (2006). *Melatonin: Biological Basis of its Function in Health and Disease*. Texas, USA, Landes Bioscience.

Pershin, Y. V.; La Fontaine, S.; Di Ventra, M. (2009). *Memristive model of amoeba's learning*. arXiv:0810.4179v3 [q-bio.CB].

Qingjiang, L. et al. (2014). *Memory Impedance in TiO_2 based Metal-insulator-Metal Devices*. Scientific Reports, 4:4522, pp. 1-6.

Saigusa, T. (2008). *Amoebae Anticipate Periodic Events*. PRL 100, 018101(4).

Salatino, D. R. (2013). *Psiquis – Estructura y Función*. Autoedición, Mendoza, Argentina. ISBN: 978-987-33-3808-3.

Salatino, D. R.; Puglesi, A. E. (2018a). "*Neuron as an electric PAU*" Inter. J. Res. Methodol. Soc. Sci., Vol., 4, No. 4: pp. 59-76. (Oct. – Dec. 2018); ISSN: 2415-0371.

Salatino, D. R. (2018b). *Tratado de Psicolingüística. Adquisición, Comprensión y Producción del Lenguaje Natural Humano*. Autoedición, Mendoza, Argentina. ISBN: 978-987-778-829-7.

Vizi, E. S. (2008). *Handbook of Neurochemistry and Molecular Neurobiology. Neurotransmitter Systems*. New York, Springer.

Yang, J. J. et al. (2008). *Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices*. Nature Nanotechnology, Vol 3, pp. 429-433.

Zyarah, A. M. (2020). *Energy Efficient Neocortex-Inspired Systems with On-Device Learning*. Tesis Doctoral ante el Department of Computer Engineering Kate Cleason College of Engineering – Rochester Institute of Technology – Rochester, New York.